

Wir arbeiten für Menschen.
Wir gestalten Zukunft.
Wir sind Teil der Lösung.
Immer besser bauen:

DER EISENBAHN INGENIEUR

INTERNATIONALE FACHZEITSCHRIFT
FÜR SCHIENENVERKEHR & TECHNIK

HERAUSGEBER:
VERBAND DEUTSCHER
EISENBAHN-INGENIEURE E.V.

VDEI

Euro 33,58 | Dezember 2025

12 | 25

Infrastruktur –
Anwendungsfälle für eine digitale
Eisenbahninfrastrukturkarte

VIAnumero –
Erkennung und Analyse
von Eisenbahnrandwegen

Weichenschwellen –
Mit Schotterboxversuchen das
Setzungsverhalten untersuchen

Fahrzeuginstandhaltung –
Potenziale von Retrofit,
Refurbishment und Upgrades

Leitbild sturmsichere Schiene –
Mehr Betriebssicherheit
und Biodiversität im Gleis

VDEI
70. Eisenbahn-
technische Fachtagung
14.–15. Januar 2026
in Leipzig

SWIETELSKY

swietelsky.com

Laboruntersuchung zum Setzungsverhalten von Weichenschwellen

Schotterboxversuche mit Schwellen sind ein probates Mittel, um das Setzungsverhalten einer Schwelle zu untersuchen.

GERNOT GROHS | PAUL PIRCHER |
MARTIN QUIRCHMAIR | HARALD LOY |
KLAUS SIX | FERDINAND POSPISCHIL

Weichen sind zentrale Bestandteile der Eisenbahninfrastruktur und entscheidend für einen effizienten Bahnbetrieb. Im österreichischen Netz sind rund 13 000 Weichen in Betrieb. Die spezielle Geometrie der Weiche, insbesondere die unterschiedlichen Schwellenlängen und der Übergang von Kurz- zu Langschwelle, führt jedoch zu asymmetrischer Belastung und strukturellen Unstetigkeiten. Dies führt zu Herausforderungen in Betrieb und Instandhaltung. Zudem kommt es durch die Unterbrechung der Lauffläche zu Stoßbelastungen und erhöhter Dynamik. Der beschleunigte Verschleiß des Schotters sowie die Setzung der Schwellen stellen damit eine wesentliche Komponente für die Erhaltung der Gleisgeometrie und der Betriebssicherheit dar. In einer Laboruntersuchung wurde das Setzungsverhalten von Weichenschwellen untersucht, um die dafür verantwortlichen Mechanismen besser zu verstehen und entsprechende Simulationsmodelle zu kalibrieren und validieren.

Einleitung

Schottergleise gewährleisten seit fast 200 Jahren einen zuverlässigen und siche-

ren Bahnbetrieb. Gleichzeitig erfordert diese Bauweise regelmäßige Instandhaltung, da sich die Gleisgeometrie infolge von Setzung im Laufe der Zeit verschlechtert. Ein wesentlicher Teil dieser Setzungen entsteht in der Schotterschicht, deren mechanisches Verhalten unter dynamischer Belastung hoch komplex und stark von den örtlichen Randbedingungen abhängig ist.

Besonders im Bereich von Weichen treten die Herausforderungen des Systems zutage. Die spezielle Geometrie der Weiche verursacht asymmetrische Belastungen, die durch Fahrtrichtungswechsel und Unstetigkeiten in der Lauffläche zusätzlich verstärkt werden. Dies führt zu überdurchschnittlich hohen und ungleichmäßigen Setzungen, die nicht nur die Gleisgeometrie beeinträchtigen, sondern auch den Instandhaltungsaufwand erheblich erhöhen.

Die Instandhaltung von Schottergleisen ist mit hohen Kosten verbunden. Der zunehmende Personen- und Güterverkehr führt zu einer stärkeren Beanspruchung einzelner Streckenabschnitte. Dadurch steigt der Instandhaltungsbedarf, während gleichzeitig immer weniger Zeitfenster für die Arbeiten zur Verfügung stehen. Um Predictive Maintenance umzusetzen, ist eine Setzungsprognose anhand von individuellen Fahrzeug-Fahrweg-Daten notwendig. Diese Setzungen lassen sich mit empirischen Setzungsmodellen nur schwer abbilden oder

zuverlässig vorhersagen. Daher wird häufig auf experimentell ermittelte Werte zurückgegriffen, um das Setzungspotenzial unter bestimmten Bedingungen abzuschätzen. Zwar existieren solche empirischen Modelle, die Schottersetzung in Abhängigkeit von Achsüberfahrten oder kumulierter Last prognostizieren, doch liefern sie oftmals stark abweichende Ergebnisse.

Eine robuste Gleiskonstruktion kann hier Abhilfe schaffen: Sie reduziert den Wartungsaufwand, verlängert die Lebensdauer und senkt dadurch die Gesamtkosten. Voraussetzung dafür ist jedoch ein fundiertes Verständnis des Zusammenspiels von Fahrzeugbelastung, Schwellen und Schotter sowie der zugrunde liegenden Setzungsmechanismen.

Setzung der Schotterschicht und Einflussfaktoren

Die Setzung von Weichenschwellen in Schottergleisen ist ein komplexer Prozess, der von zahlreichen Einflussgrößen bestimmt wird. Dabei spielen die mechanischen Eigenschaften der beteiligten Komponenten, die Belastungsbedingungen durch den Zugverkehr sowie die Interaktion zwischen Schwellen und Schotter eine entscheidende Rolle.

Der Setzungsprozess lässt sich grundsätzlich in zwei Phasen gliedern: eine anfänglich beschleunigte Phase direkt nach dem

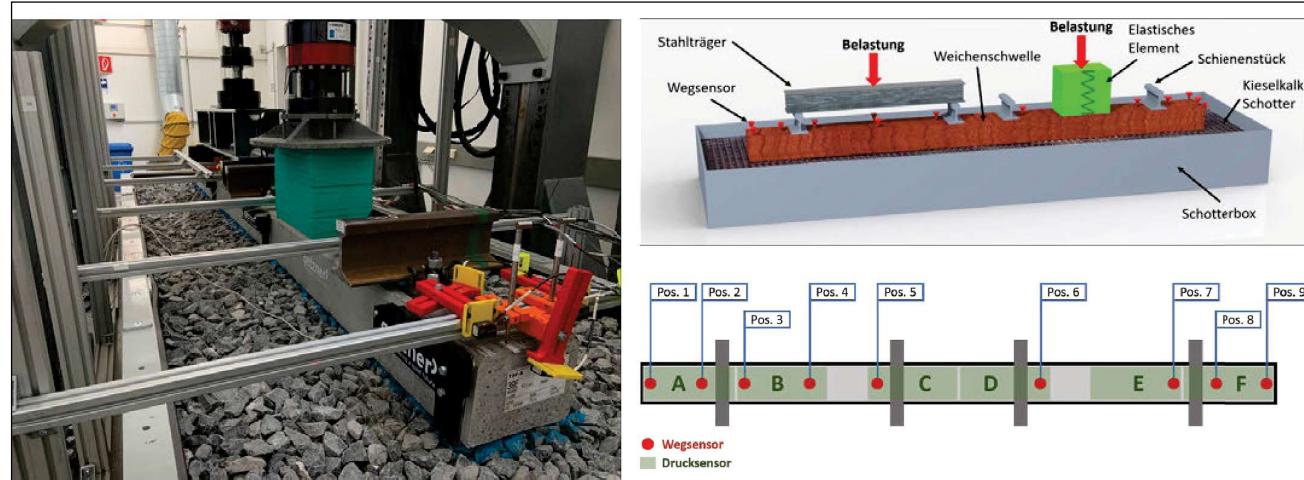


Abb. 1: Versuchsaufbau des Schotterboxtests [8]

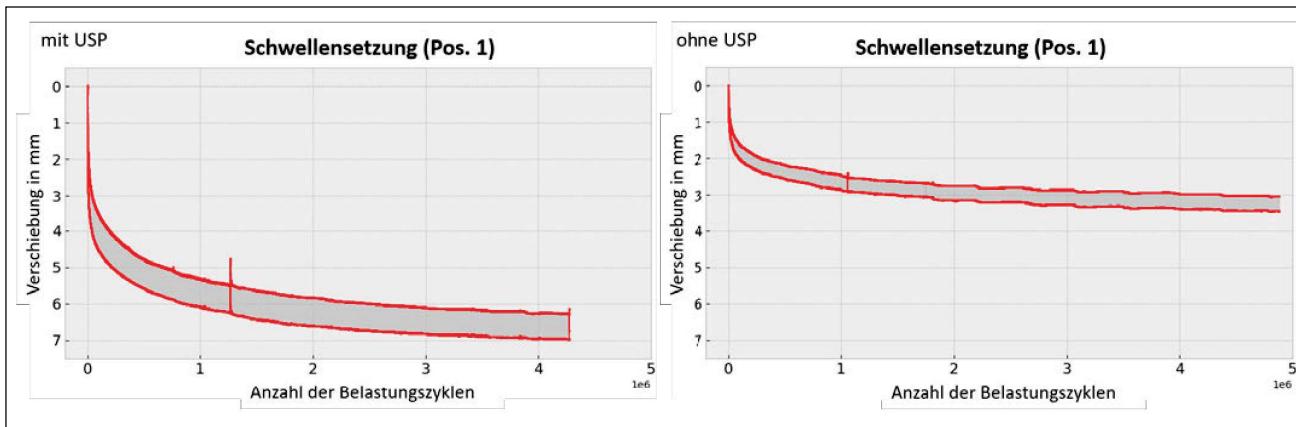


Abb. 2: Setzungsverhalten der unbesohnten und besohnten Schwelle (Messwerte von Lasersensor 1) [8]

Einbau des frischen Schotters oder nach einer Stopfmaßnahme sowie eine daran anschließende Phase mit langsamer, kontinuierlicher Absenkung. Die erste Phase ist primär durch die Verdichtung (Reduktion der Porosität) bzw. Umlagerung des Schotters geprägt. Sobald dieser eine höhere Dichte erreicht, treten Partikelkantenverschleiß und in weiterer Folge auch Partikelbruch in den Vordergrund. Häufig wird das Setzungsverhalten durch oben erwähnte, empirisch logarithmische Modelle beschrieben, deren Ergebnisse mit Laborversuchen und realen Beobachtungen weitgehend übereinstimmen. Dennoch wird die tatsächliche Setzung von einer Vielzahl zusätzlicher Faktoren beeinflusst, die in solchen Modellen nur unzureichend erfasst werden. Auch die stochastische Natur des Schotters trägt wesentlich zur Variabilität des Setzungsverhaltens bei.

Ein wesentlicher Mechanismus, der für die Setzung von Schotter verantwortlich ist, ist die Umlagerung der Schotterschicht. Bereits vergleichsweise einfache Anpassungen der Unterbaukonstruktion, wie etwa eine Erhöhung des seitlichen Begrenzungsdrucks, eine flachere Schotterschulterneigung, der Einsatz von Geogittern oder die Modifikation des Schotters, können die Leistungsfähigkeit des Gleises verbessern [1, 2, 3]. Unter wiederholten Zugüberfahrten kommt es zur Verdichtung, Verschleiß, Zerkleinerung und Umlagerung des Schotters. Als Resultat erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Ausbildung von Hohllagen und eine Verminderung der Gleislagequalität. Un-

tersuchungen belegen, dass Qualität und Verhalten von Schotter, Unterschotter und Untergrund entscheidend für das Ausmaß der Schwellensetzungen sind. Dabei spielt insbesondere die Belastungsfrequenz eine zentrale Rolle. Höhere Frequenzen führen zu ausgeprägteren Setzungen und können kritische Effekte hervorrufen [4, 5].

Auch die mechanischen Eigenschaften und die Geometrie der Schwellen selbst haben Einfluss auf das zeitliche Setzungsverhalten im Schotter. Dabei spielen Schwellenbesohlungen eine zentrale Rolle, da sie die Bettung der Schwelle und vor allem die Interaktion zwischen Schwelle und Schotter maßgeblich beeinflussen. In zahlreichen Studien wurden die Vorteile von Schwellenbesohlungen (Under Sleeper Pads, USP) belegt. Sie tragen zur Reduzierung des Instandhaltungsaufwands, zur Verbesserung der Gleislage und zur Senkung der Lebenszykluskosten bei [6, 7]. USP vermindern die Auswirkungen dynamischer Lasten, verteilen Kräfte gleichmäßiger im Schotter und reduzieren die Schotterkontaktepression an der Schwellenunterseite [8, 9]. Damit sinkt auch die Gefahr ungleichmäßiger Setzungen, während Kantenbrüche einzelner Schottersteine an der Schnittstelle von Schwelle und Schotterbett deutlich reduziert werden [10].

Labortest

In einem Laborversuch wurde das Verhalten einer Weichenschwelle unter realitätsnahen Bedingungen untersucht, um ein besseres Verständnis für das Setzungsverhalten des

Schotters unter asymmetrischen Belastungen – wie sie im Bereich von Weichen auftritt – zu gewinnen und Ansätze für mögliche konstruktive Verbesserungen sowie Inputparameter für Diskrete-Elemente-Methode (DEM)-Simulationen des Schotterbetts abzuleiten.

Dazu wurde eine 4,2 m lange Betonschwelle (Typ TSF-A) in einem mit Schotter gefüllten Stahlkasten (5 m × 1,5 m × 0,5 m) unter asymmetrischen Belastungsbedingungen geprüft (Abb. 1). Die Schwelle wurde zyklisch mit Kräften von bis zu 160 kN belastet und mit mehr als 4 Mio. Lastwechsel beansprucht. Auf dem Stammgleis erfolgte die Krafteinleitung über einen Stahlträger gleichmäßig auf beide Schienenstücke, während das Zweiggleis über ein elastisches Federelement vorgespannt wurde, um den Widerstand im Gleisrost zu simulieren.

Untersucht wurde jeweils eine Schwelle mit und eine ohne Schwellenbesohlung. Zur Erfassung des Verhaltens kamen Wegsensoren auf der Oberseite sowie Drucksensoren [11] an der Unterseite der Schwelle zum Einsatz. Der Schotter wurde lagenweise eingebracht und mit einer Rüttelplatte verdichtet, um die Versuche entsprechend der Norm EN 17282/EN 16730 durchzuführen. Zusätzlich wurden die Wände des Stahlkastens mit einer dämpfenden Schicht ausgekleidet, um Schwingungen und Reflexionen zu minimieren, während eine elastoplastische Schicht am Boden den Untergrund simulierte.

Im Dauerschwingversuch erfolgte die Belastung der Schwelle mit einer zyklischen Last zwischen 5 kN und 160 kN bei Frequenzen von anfangs 3 Hz und später 5 Hz.



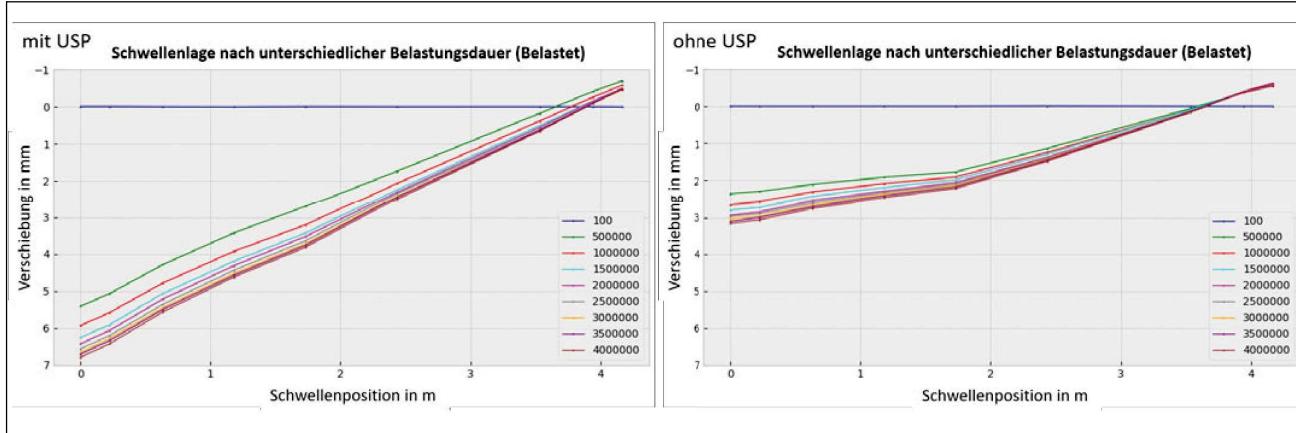


Abb. 3: Schwellenlage nach unterschiedlicher Belastungsdauer [8]

Setzung der Schwelle

Bei beiden Schwellentypen zeigte sich am Beispiel des 1. Messpunkts ein degressives Setzungsverhalten (Abb. 2). Der größte Teil der Setzung tritt wie erwartet in der Anfangsphase auf, anschließend nähert sich die Kurve einem Grenzwert an. Schwellen ohne USP wiesen dabei deutlich unregelmäßige Setzungen auf als Schwellen mit USP. Eine mögliche Ursache ist der direkte, harte Kontakt zwischen Schwelle und Schotter, der zu höheren Schotterkontaktpressungen führt und damit verstärkt Schotterbruch sowie Umlagerungen begünstigt. Mit USP erfolgt die Lastabtragung gleichmäßiger, wodurch Druckspitzen reduziert und Hohlräumbildungen weitgehend vermieden werden. Abb. 3 zeigt die vertikale Schwellenposition über die Schwellenlänge zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Dauerschwellversuche.

Wie Abb. 2 zeigt, sind die Gesamtsetzungen bei Schwellen mit USP zwar größer, jedoch treten – wie in Abb. 3 ersichtlich – bei Schwellen ohne USP aufgrund des ungleichmäßigen Lastabtrags deutlich stärkere Biegeverformungen der Schwelle auf. Dies erhöht die Anfälligkeit für Schäden und begünstigt ungleichmäßige Setzungen. Die größeren Bewegungsamplituden bei Schwellen mit USP lassen sich durch den elastischen Anteil der elasto-plastischen Materialeigenschaften erklären. Es ist zu erwähnen, dass bei den Setzungskurven der Situation mit USP (10 mm Dicke) auch die plastische Einbettung der Schottersteine in die USP inkludiert ist. Dies kann nicht als Setzung im Sinn des Schotterbruchs gewertet werden, sondern ist ein gewünschtes Verhalten der Schwellensohle, welches essenziell zur Schonung und Stabilisierung des Schotters beiträgt. Die gemessene Set-

zung setzt sich daher aus einer Kombination von Schottersetzung und Materialverformung (Schottereinbettung in der USP) zusammen, deren Anteile nicht separat erfasst werden können.

Zudem verlieren beide Schwellentypen auf der unbelasteten Seite den Kontakt zum Schotter (im Bereich ca. 4 m). Bleibt eine Seite der Schwelle weitgehend unbelastet, während seitliche Druckkräfte wirken, kommt es zu Umlagerungen im Schottergefüge. Dies beschleunigt die Verschlechterung der Gleislage und erhöht den Instandhaltungsbedarf.

Druckverteilung unter der Schwelle

Die in Abb. 4 und Abb. 5 dargestellten Druckverteilungen in der Grenzschicht der Schwellenunterseite zum Schotterbett zeigen als aufsummierte Heatmap (zu Belastungsbeginn und nach 4 Mio. Lastwech-

seln während der Maximalbelastung), dass durch den Einsatz von USP eine deutlich gleichmäßige Lastverteilung erreicht wird und dadurch weniger hohe Lastspitzen auf die Schottersteine wirken.

Bei der Schwelle ohne USP bildet sich hingegen in der Mitte eine Hohlilage, die zu den in Abb. 3 sichtbaren Biegeverformungen führt. Da keine Zwischenschicht in Form der USP vorhanden ist, können kleine Unebenheiten nicht ausgeglichen werden, was eine sehr ungleichmäßige und stark zufallsabhängige Druckverteilung zur Folge hat.

Darüber hinaus wird bei Schwellen mit USP die Last über größere Flächen (Schotterkontaktfäche) verteilt, wodurch die lokalen Belastungsspitzen deutlich reduziert werden. Betrachtet man Setzung und Lastabtrag gemeinsam, so zeigt sich, dass die Setzung maßgeblich durch den Lastangriffspunkt und die daraus resultierende Druckverteilung bestimmt wird – mit stärkerer Setzung auf der belasteten und deutlich geringerer Setzung auf der unbelasteten Seite.

Die Ergebnisse zeigen, dass USP die Druckverteilung unter der Schwelle deutlich verbessern, Druckspitzen reduzieren und Biegeverformungen wirksam verringern können. Insgesamt ermöglichen sie eine gleichmäßige Kraftübertragung, senken kritische Spannungen im Schotter und tragen zu einer langfristig stabilen Bettung der Schwelle bei – insbesondere in hochbelasteten Bereichen wie Weichen oder Übergangszonen. Mithilfe von Drucksensoren konnte zusätzlich gezeigt werden, dass sich die Lastverteilung im Zeitverlauf leicht verändert: Druckspitzen können abgebaut werden, bestehende Kontaktstellen verschwinden, während sich neue ausbilden.

Der Laborversuch liefert wertvolle Einblicke in das Verhalten von Weichenschwellen mit und ohne USP, bietet wichtige Erkenntnisse zu den Lastübertragungsmechanismen in Weichen und bildet damit eine fundierte Basis für zukünftige Forschung, die Weiterentwicklung von Gleiskomponenten und nachhaltige Instandhaltungsstrategien. Genaue auch Simulationen der DEM können nun anhand der Ergebnisse besser kalibriert werden, um dem Digitalen Zwilling des Fahrwegs etwas näherzukommen. ■

Danksagung

Diese Arbeit entstand an der Technischen Universität Graz gemeinsam mit Virtual Vehicle Research GmbH in Graz, Österreich. Die Autoren danken sich für die Förderung im Rahmen des COMET K2 Competence Centers for Excellent Technologies durch das Österreichische Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BM-MI), das Österreichische Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus (BM-WET), das Land Steiermark (Abt. 12) sowie die Steirische Wirtschaftsförderung (SFG).

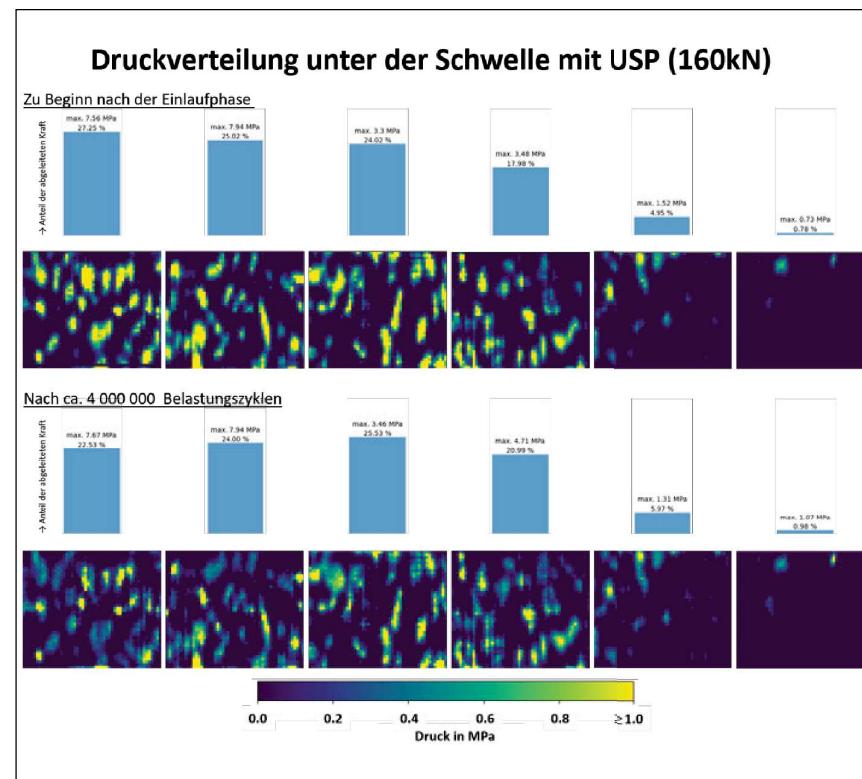


Abb. 4: Druckverteilung unter der Schwelle mit USP bei Belastung [8]

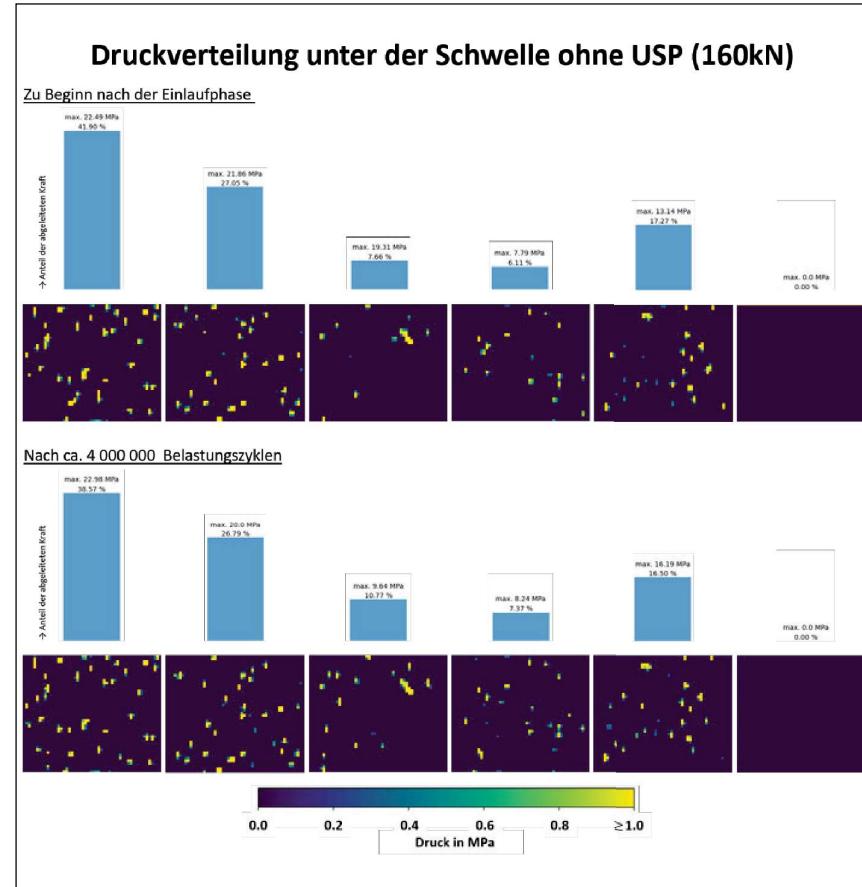


Abb. 5: Druckverteilung unter der Schwelle ohne USP bei Belastung [8]

Das Programm wird durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) abgewickelt. Ebenfalls danken sie den unterstützenden Industriepartnern Getzner Werkstoffe GmbH, ÖBB Infrastruktur AG, SBB Infrastruktur, voestalpine Railway Systems GmbH. Die Untersuchungen wurde im Rahmen des COMET-Projekts Fahrbahnmodellierung 2 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in detaillierter Version unter „Grohs, G., Pircher, P., Quirchmair, M. et al. Behavior of turnout sleepers in a large-scale ballast box test. Sci Rep 15, 16717 (2025)“ auffindbar.

DOI 10.61067/251211

QUELLEN

- [1] Lackenby, J.; Indraratna, B.; McDowell, G.: Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under Cyclic triaxial loading. *Géotechnique* 57 (6), 527–536. <https://doi.org/10.1680/geot.2007.57.6.527> (2007)
- [2] Abadi, T.; Le Pen, L.; Zervos, A.; Powrie, W.: Improving the performance of railway tracks through ballast interventions. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit.* 232 (2), 337–355. <https://doi.org/10.1177/0954409716671545> (2018)
- [3] Sd, K.; Karimullah Hussain, B.; Indraratna, J.; Vinod, S.: An experimental investigation on the deformation and degradation behaviour of geogrid-reinforced ballast (2023)
- [4] Sun, Q. D.; Indraratna, B.; Nimbalkar, S.: Deformation and degradation mechanisms of railway ballast under high frequency Cyclic loading. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 142, 1. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001375](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001375) (2016)
- [5] Sun, Q. D.; Indraratna, B.; Nimbalkar, S.: Effect of Cyclic loading frequency on the permanent deformation and degradation of railway ballast. *Géotechnique* 64 (9), 746–751. <https://doi.org/10.1680/geot.14.T.015> (2014)
- [6] Marschnig, S.; Ehrhart, U.; Offenbacher, S.: Long-Term behaviour of padded concrete sleepers on reduced ballast bed thickness. *Infrastructures* 7 (10), 132. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7100132> (2022)
- [7] Le Pen, L.; Watson, G.; Hudson, A.; Powrie, W.: Behaviour of under sleeper pads at switches and crossings – field measurements. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F: J. Rail Rapid Transit.* 232 (4), 1049–1063. <https://doi.org/10.1177/0954409717707400> (2018)
- [8] Grohs, G.; Pircher, P.; Quirchmair, M. et al.: Behavior of turnout sleepers in a large-scale ballast box test. *Sci Rep* 15, 16717 (2025)
- [9] Gräbe, P.; Mtshotana, B.; Sebati, M.; Thünemann, E.: The effects of under-sleeper pads on sleeper-ballast interaction. *J. S Afr. Inst. Civ. Eng.* 58 (2), 35–41. <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2016/v58n2a4> (2016)
- [10] Navaratnrajah, S. K.; Indraratna, B.; Nimbalkar, S.: Application of shock Mats in rail track foundation subjected to dynamic loads. *Procedia Eng.* 143, 1108–1119. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.152> (2016)
- [11] Loy, H.; Kessler, M.; Augustin, A.; Sehner, M.; Quirchmair, M.: Elastizität in Weichen der nächsten Generation. *ZEV Rail* (146) 03/2022. 68–75. https://www.getzner.com/media/21038/download/2022_ZEV_Elasticity%20in%20next-generation%20turnouts_Loy_Quirchmair_Sehner_Kessler_Augustin_DE.pdf?v=1



Dipl.-Ing. Gernot Grohs
Universitäts-Projektassistent
Institut f. Eisenbahn-Infrastrukturdesign
Technische Universität Graz, AT-Graz
grohs@tugraz.at



Dipl.-Ing. Paul Pircher
Researcher
Virtual Vehicle Research GmbH,
AT-Graz
paul.pircher@v2c2.at



Dipl.-Ing. Martin Quirchmair
System Development
Getzner Werkstoffe GmbH, AT-Bürs
martin.quirchmair@getzner.com



**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.
Harald Loy**
Leiter Lehrstuhl Eisenbahnwesen
Institut für Infrastruktur
Universität Innsbruck, AT-Innsbruck
harald.loy@uibk.ac.at



Dr. Klaus Six
Key Researcher
Virtual Vehicle Research GmbH,
AT-Graz
klaus.six@v2c2.at



**Univ.-Prof. Dr. techn.
Ferdinand Pospischil M. Sc.**
Institutsleiter
Institut f. Eisenbahn-Infrastrukturdesign
Technische Universität Graz, AT-Graz
ferdinand.pospischil@tugraz.at

